doi:10.13866/j.azr.2019.04.03

荒漠-绿洲过渡带土壤温度变化分析①

缑倩倩[1]，李乔乔[1,3]，屈建军[2]，王国华[1]
（1. 山西师范大学地理科学学院，山西 临汾 041004；2. 中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室，甘肃 兰州 730000；3. 西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070）

摘　要：根据中国科学院临泽内陆河流域站2004—2014年的土壤温度与气象要素数据，分析了河西走廊中部荒漠-绿洲过渡带土壤温度年内和年际变化规律及主要影响因素。结果表明：土壤温度日变化与月变化大致呈正弦曲线，各层土壤最高、最低温度出现的时间随着土壤深度的增加逐渐推迟；年均土壤温度总体上随着土壤深度的加深先减小后增加；气温是与土壤温度变化相关性最强的气象要素；同时，明确了该区3个特征差异明显的土壤温度层次：0~20 cm土壤温度活跃层，40 cm土壤温度过渡层和60~100 cm土壤温度稳定层，与其他地区结果有所差异。最后，利用相关性分析、多元逐步线性回归方法建立了气象指标与各层土壤温度之间经验预报方程。

关键词：荒漠-绿洲过渡带；土壤温度；变化特征；临泽；河西走廊

土壤温度是影响大气环流和气候变化的重要因素之一[1-2]。土壤温度条件对土壤物理能量交换过程和土壤化学反应强度有直接影响[3]。除此之外，土壤温度对植物的生长也有很大影响[4]，观测和研究土壤温度对植物生长和农业生产具有重要的理论和实践意义[5]。

目前，关于土壤温度的研究大致集中于国家尺度和具体地区两个方面。其中，在国家尺度，已经有比较系统的研究[6-7]。但是，在典型地区，中国的土壤温度研究主要集中在农业和林业比较优势的地区[8-12]，而对于典型荒漠-绿洲过渡带的研究较少，且研究的时间尺度较短[13]。大约占地球陆地面积1/2的干旱半干旱草地和荒漠地区，与其他类型下垫面相比，其所具有的生态不稳定性特点对气候变化的响应更明显[14]。荒漠-绿洲过渡带对干旱区非常重要，既连接绿洲与荒漠两种生态系统，又是这两种生态系统之间物质循环、能量传递及信息交流的重要地区，同时也是能量、物质、信息交换最频繁的界面区域。

河西走廊是我国西北地区主要的绿洲分布区之一，同时也是西北地区重要的农作物产地，在该区社会经济发展中发挥着非常重要的作用。在绿洲和荒漠过渡带建立固沙植被可以有效防治绿洲沙漠化。在荒漠-绿洲过渡带除了人工种植的灌木种（梭梭、柠条、沙拐枣）外，还存在大量的草本植物。它们在保持近地表沙面稳定，防治土壤流失，增加生态系统物种多样性方面都起到重要作用。这些植物的根系主要分布在20~100 cm土层，对固沙植被区土壤水分、土壤温度、土壤养分异常敏感。有研究[15-17]表明，土壤温度变化会影响固沙植物的生长发育期。而在河西走廊，关于土壤水分和养分对人工固沙植物影响的研究相对较多[2,18-19]，而关于土壤温度的观测研究还相对较少。在该区开展土壤温度变化的相关研究，阐明典型荒漠-绿洲过渡带土壤温度的变化规律，明确该区不同季节长时间序列的土壤温度变化特征，能够为当地过渡带植物生长、繁殖以及演替提供理论依据，从而维持荒漠-绿洲边缘生态系统的稳定与可持续发展。为此，本文选取了中国科学院临泽内陆河流域综合研究站2004—2014年的土壤与气象数据，对河西走廊中部典型荒漠-绿洲过渡带土壤温度年内和年际变化规律及主要影响因素进行了初步的分析与讨论。

1　材料与研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于河西走廊中部中国科学院临泽内陆河流域站，地理位置99°51′~100°30′E，38°57′~

① **收稿日期：**2018-10-12；　**修订日期：**2019-01-12
基金项目：国家自然科学基金项目(41701045,41807518)；中国科学院重点实验室开放基金项目(KLDD-2017-008)
作者简介：缑倩倩(1987-)，女，博士，副教授，主要从事干旱半干旱区生态恢复方面的科研与教学工作. E-mail: gqqqianqian@163.com

39°42′N。气候类型为大陆性荒漠草原气候,年平均日照时数为3 052.9 h,昼夜温差大,年平均气温7.7 ℃。年平均无霜期为176 d。年平均降水量为118.4 mm,蒸发量为1 830.4 mm。研究区自然资源丰富,境内地形多为平原、绿洲,地势低平,灌溉农业较发达。

1.2 数据来源与处理

本文使用中国科学院临泽内陆河流域站2004年9月到2014年12月0 cm、10 cm、20 cm、40 cm、60 cm、100 cm深度的荒漠土壤温度数据以及日照时数、气温、气压、降水、太阳辐射和相对湿度共6项气象要素数据。

按照12月、1月和2月是冬季,3月、4月和5月是春季,6月、7月和8月是夏季,9月、10月和11月是秋季的顺序,形成简单的季节序列。计算6个层次日、月、季和年的平均土壤温度形成的土壤温度序列。此外,对其他6项气象要素数值也作算术平均,将变幅小于1 ℃的图像看作直线,利用SPSS软件进行相关性、主成分及多元逐步线性回归分析,利用Origin 8.0作图。

2 结果

2.1 土壤温度日变化

由图1可知,0 cm、10 cm、20 cm的土壤温度变化大致与正弦曲线相似,每日中有一个最大、最小值。最大值对应的时刻是14:00、16:00和18:00,土壤深度每增加10 cm平均滞后2 h左右;最小值出现的时刻为03:00、07:00、09:00,每加深10 cm平均推迟3 h左右。40 cm、60 cm、100 cm为土壤温度稳定层,温度基本保持在11 ℃左右。土壤的热量传输方向用垂直温度梯度来表示。土壤的垂直方向若从浅到深,土壤温度是递减的,则称为正垂直土壤温度梯度;相反则是负垂直土壤温度梯度。总的来说在0~20 cm土壤的垂直温度梯度白天是正值,夜晚是负值。40~100 cm土壤的垂直温度梯度则白天为负值,夜晚为正值。随着土壤深度增加,土壤温度日较差逐渐变小,变化程度也逐渐变小。

2.2 土壤温度月变化

从图2可知,0~100 cm土壤温度月变化表现为正弦曲线。每月有一个最大、最小值。从2月份开始,各层土壤温度的变化情况基本相同,均处于上升阶段。在1月和2月,除100 cm的深层土壤温度处于下降趋势外,其他各层的土壤温度处于增长趋

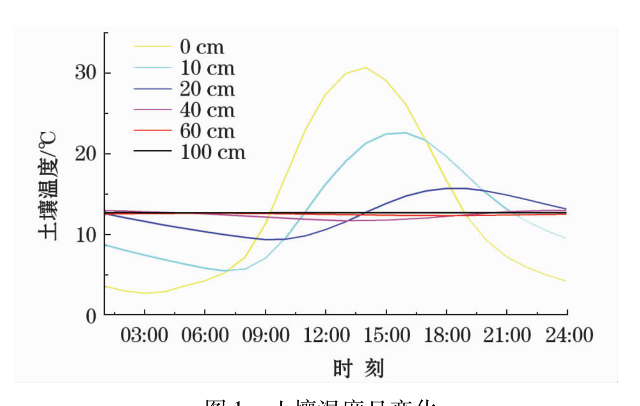


图1 土壤温度日变化

Fig.1 Daily variation of soil temperature

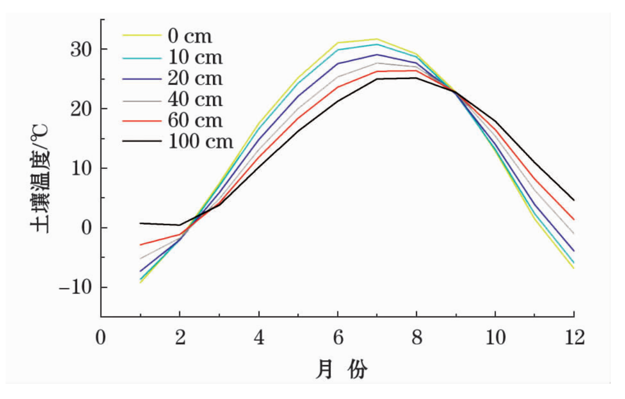


图2 土壤温度月变化

Fig.2 Monthly variation of soil temperature

势。从6月开始土壤温度随土壤深度增加依次达到最大值,之后土壤温度变化趋势基本上处于降低阶段。在2—9月之间,土壤垂直温度梯度为正,在9月到次年的2月,土壤垂直温度梯度为负,且2月和9月各层土壤温度基本是相同的。月均土壤温度的最高值出现时刻每层土壤不一致,土壤深度越深,时间越晚。最高温度在0~10 cm、20~40 cm、60~100 cm分别出现在6月、7月、8月,滞后1个月左右,各层最低温出现在1月。

土壤温度月较差如图3所示,月较差最大值出现在表层(0 cm),随着土壤深度增加,月较差逐渐变小。0~20 cm土壤温度月较差变化较大,且土层之间月较差变化也较大。40~100 cm的土壤温度月较差变化较小,且随着土壤深度增加,月较差变化较小。5月土壤温度月较差最大,12月最小。

2.3 土壤温度季节变化

从图4可以看出,在春、秋季(图4a和4c),0~20 cm土层的土壤日平均温度呈波浪形,一天中有一个最大值和一个最小值。40~100 cm的土壤日平均温度大致不变,呈线形。而在夏、冬季(图4b和4d),0~40 cm土层,平均土壤日温度呈波浪形,

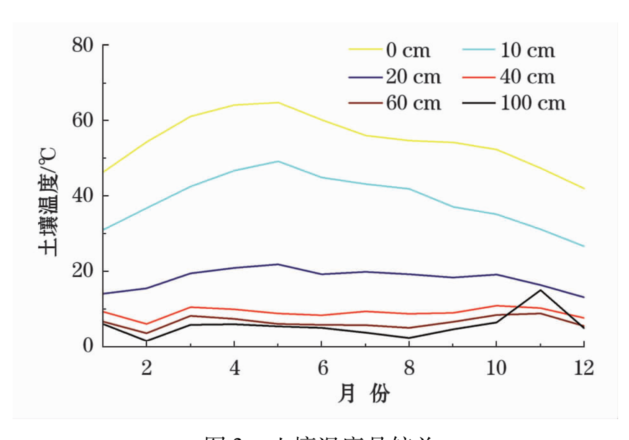


图 3　土壤温度月较差

Fig. 3　Monthly range of soil temperature

一天中有一个最大值和一个最小值。60～100 cm 土层的土壤日均温度大致不变,呈线形。

如图 5 所示,秋、冬季日均土壤垂直温度梯度为负,其他两季日均土壤垂直温度梯度表现为正。日变幅最大、最小值分别出现在夏、冬两季。0～20 cm 土层中日均温度春季比秋季大;40～100 cm 土层秋季日均温度比春季大,土壤日均最高温和最低温分别出现在夏、冬两季。

2.4　土壤温度年变化

从图 6 可以看出,土壤的温度年变化呈不规则趋势,总体来说,地表的温度最高,随着深度的增加,土壤温度的变化趋势为:先减小后升高。土壤温度回升的深度不稳定,大致在 20～40 cm 处。

2.5　不同季节土壤温度年际变化

图 7 为 2004—2014 年不同季节土壤温度的变化情况。从图 7 可以看出,春季与夏季土壤垂直温

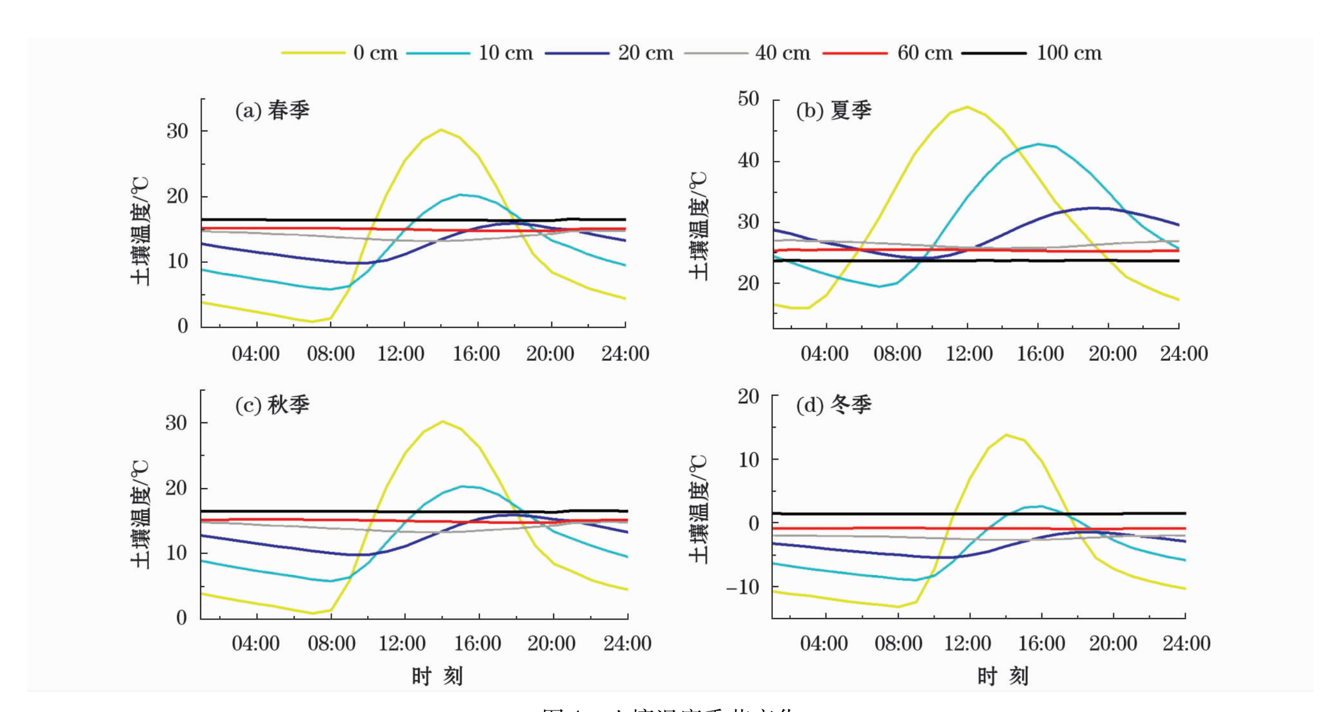


图 4　土壤温度季节变化

Fig. 4　Seasonal variation of soil temperature

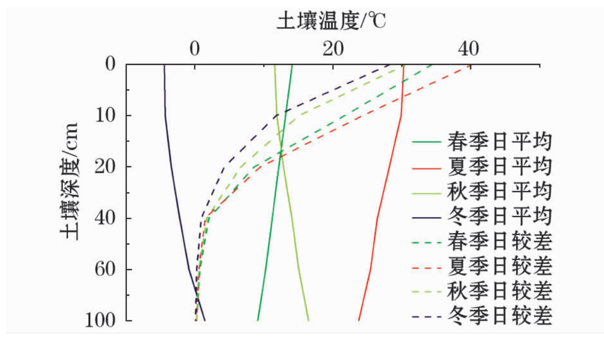


图 5　土壤温度日均值与日较差季节对比

Fig. 5　Seasonal variation of daily average and daily range of soil temperature

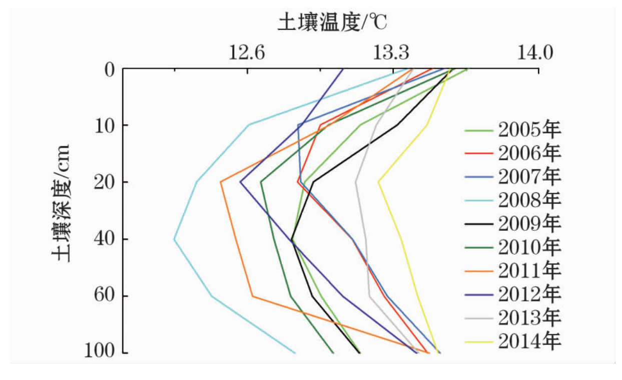


图 6　土壤温度年际变化

Fig. 6　Interannual variation of soil temperature

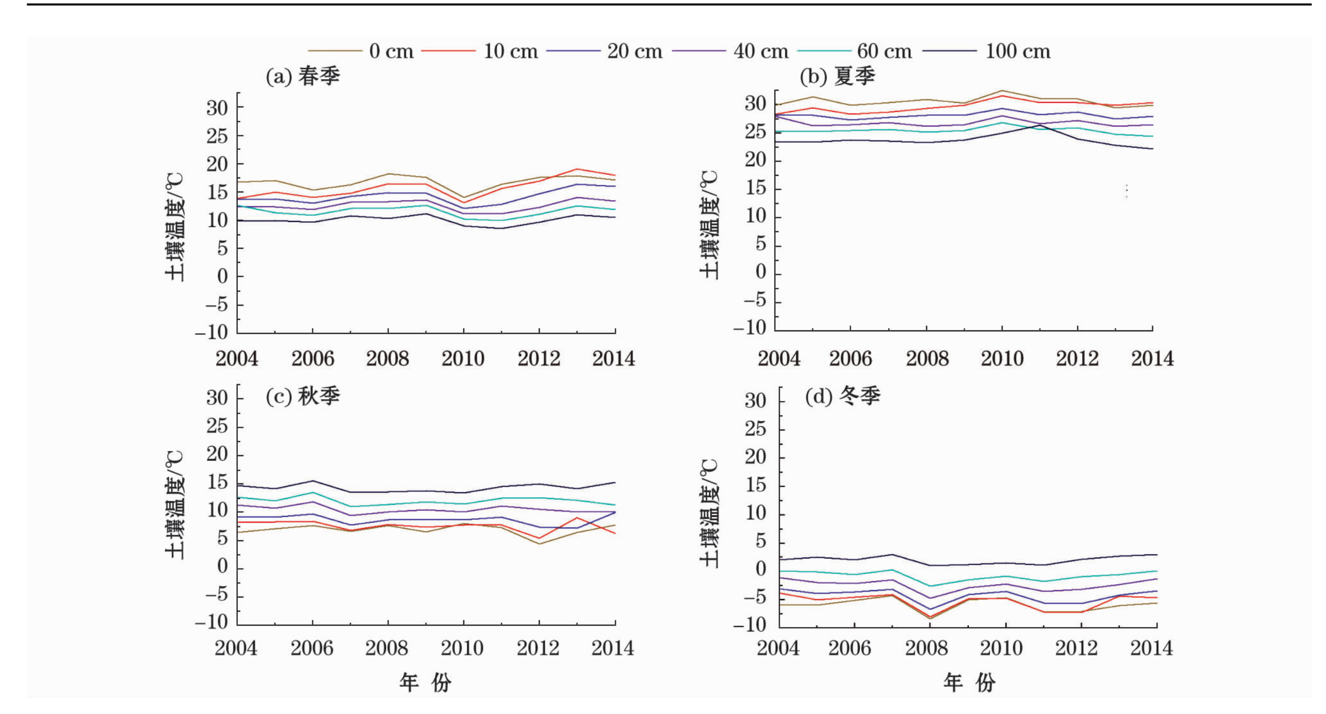


图 7　不同季节土壤温度年际变化

Fig. 7　Interannual variation of seasonal soil temperature

度梯度为正值，秋季与冬季土壤垂直温度梯度为负。春季，各层土壤温度在 2004—2009 年表现出轻微的波动升高的趋势，在 2010 年春季各层土壤温度均出现一个最低值，之后在 2010 年开始春季土壤温度又开始逐年增加，波动幅度最大值为 5.98 ℃，出现在 10 cm 土层；夏季 0 ~ 60 cm 土壤温度在 2004—2010 年表现出缓慢升高趋势，从 2010 年后又开始逐年下降，波动幅度最大值为 3.21 ℃，出现在 10 cm 土层；秋季各层土壤年际变化趋势不明显，仅 0 cm 和 10 cm 土层在 2012 年出现了一个低值，波动幅度为 3.66 ℃，出现在 10 cm 土层；冬季，各层土壤在 2008 年均出现了一个最低值，其他年份变化呈现出一定的波动，波动幅度最大值为 4.23 ℃，同样也出现在 10 cm 土层。

2.6　主成分回归分析

将相对湿度设定为 X_1，气压为 X_2，太阳辐射为 X_3，日照时数为 X_4，降水量为 X_5，温度为 X_6。基于上述因子对土壤温度进行主成分回归分析模拟，采用 2004—2010 年的土壤月平均温度，在 SPSS 中进行主成分分析，得到各主成分的特征值、贡献率、累积贡献率和主成分载荷矩阵（表 1）。

根据主成分个数提取原则，第一、二个主成分较好地反应了 6 项指标的信息，第一个主成分 Z_1 与 X_3、X_4、X_6 表现出较强的正相关关系，可以认为第一主成分 Z_1 是热量的代表；第二主成分 Z_2 与 X_1 和 X_5 具有较强的正相关关系，因此可以认为 Z_2 是水分的代表。将原来的 6 个因素用第一、二个主成分来表示。表 2 中第一、二主成分对应的因子载荷与第一、二主成分特征值比值相应的系数是由该值的平方根获得的，然后将计算出的特征向量乘以标准化后的气象指数得到主成分，即综合气象指数，在此基础上建立综合气象指数和各层土壤温度之间的回归模型，输出值如表 2 所示。

表 1　主成分分析结果及主成分 1、2 的载荷矩阵

Tab. 1　Principal component analysis and load matrixes of principal components 1 and 2

	特征值	贡献率 /%	累积贡献率 /%		主成分 1 (Z_1)	主成分 2 (Z_2)
X_1	3.718	61.964	61.964	相对湿度	-0.533	0.743
X_2	1.485	24.743	86.706	气压	-0.895	-0.210
X_3	0.330	5.493	92.200	太阳辐射	0.972	-0.038
X_4	0.252	4.205	96.405	日照时数	0.799	-0.421
X_5	0.147	2.457	98.861	降水	0.462	0.812
X_6	0.068	1.139	100.000	气温	0.914	0.226

2.7　多元线性逐步回归分析

采用 2004 年 1 月至 2014 年 12 月的气象数据，将相对湿度设定为 RH、日照时数为 S、气压为 P、太阳辐射为 Eg、降水为 R、气温为 T。由表 3 可知，0 ~ 20 cm 土壤温度的主要影响因素是气温、太阳辐射、气压。40 cm 深度及以下，作用于土壤温度的主要因素为气温、相对湿度和太阳辐射，从这层开始增加

表 2　主成分公式

Tab. 2　Formulas of principal components

土壤深度/cm	公　式	调整 R^2 值
0	$T_0 = 12.548Z_1 + 6.345Z_2 + 13.832$	0.940
20	$T_{20} = 11.115Z_1 + 5.007Z_2 + 13.157$	0.910
40	$T_{40} = 10.049Z_1 + 3.904Z_2 + 13.13$	0.868
60	$T_{60} = 9.036Z_1 + 3.035Z_2 + 13.171$	0.818
100	$T_{100} = 7.532Z_1 + 1.806Z_2 + 13.397$	0.718
主成分	$Z_1 = -0.533X_1 - 0.895X_2 + 0.972X_3 + 0.799X_4 + 0.462X_5 + 0.914X_6$ $Z_2 = 0.743X_1 - 0.210X_2 - 0.038X_3 - 0.421X_4 + 0.812X_5 + 0.226X_6$	

注:T_0、T_{20}、T_{40}、T_{60}、T_{100}分别指 0 cm、20 cm、40 cm、60 cm、100 cm 各层土壤温度。

表 3　多元线性逐步回归方程

Tab. 3　Equations of multiple linear stepwise regression

土壤深度/cm	公　式	调整 R^2 值
0	$Tg_0 = 0.847T + 0.623Eg - 0.308P + 261.146$	0.989
10	$Tg_{10} = 0.865T + 0.489Eg - 0.270P + 229.986$	0.983
20	$Tg_{20} = 0.925T + 0.218Eg - 0.139P + 120.730$	0.984
40	$Tg_{40} = 0.931T + 0.075RH + 0.729S - 4.649$	0.978
60	$Tg_{60} = 0.943T - 0.331Eg + 0.104RH + 1.268S - 4.703$	0.967
100	$Tg_{100} = 0.893T - 0.637Eg + 0.157RH + 1.951S - 6.691$	0.932

注:Tg_0、Tg_{20}、Tg_{40}、Tg_{60}、Tg_{100}分别指 0 cm、20 cm、40 cm、60 cm、100 cm 各层土壤温度。

了相对湿度,说明水分在这一土层开始对土壤温度有了一定影响。

3　讨 论

在土壤温度日变化中,太阳辐射对浅层土壤的作用比较强,对深层土壤的作用很小。这是由于日出后,太阳辐射逐渐增强,浅层土壤升温,一部分热量向下传输,使深层土壤的温度升高,深层土壤温度的升高以一定的时间推迟。在日落前太阳的辐射逐渐变小,此时的土壤温度上下相差不大。日落以后,只剩地表向外放出长波辐射,使能量传递方向改变,由深层土壤向浅层土壤传递。日出之后,地表温度持续升高,能量的传递方向再一次改变,就此完成一个日周期的循环。

在月变化中,各层土壤温度的传输在一年之中产生了两次变化,与季节有着明显的响应。这一结果与高红贝等[11]的研究一致。太阳辐射年代际变化对土壤的温度长期变化的影响较大:夏季北半球地表向外放出的热量小于地表接收的热量,使得地表的温度首先升高,这时地表一部分热量要向下传输,使深层土壤温度升高,但辐射强度越来越小。秋冬季,由于地球表面所接收的太阳辐射减弱,在一段时间之后,地球表面温度下降,上下层之间的温差变小,整层几乎是等温层。随着太阳辐射进一步减弱,土壤温度进一步降低,深层土壤温度大于浅层土壤温度,土壤热量从深层转移到表层,使土壤中的垂直温度梯度的方向发生了变化,完成一个年周期的循环[14]。

在年变化中,年平均温度都是先随土壤的加深温度逐渐变小,到 20～40 cm 时温度开始回升。初步认为在这一深度范围影响土壤温度的影响因子发生了变化。再结合日、季均土壤温度的分析结果来看,0～20 cm 土层的土壤温度变化大致相同,40～100 cm 的土壤温度变化大致相同。许多研究[20－22]表明,土壤温度的变化会影响植物种子的发芽、开花以及植物根系对水分的吸收。有研究发现,一定深度的土壤温度每升高 1 ℃,植物的生长发育期大约提前 1 d,并且还能使植物叶面积指数发生改变[15]。通过对该区不同季节土壤温度年际变化分析可知,各个季节土壤温度出现了不同程度的年际波动,尤其是 0～10 cm 土层,其中春季年际之间的变化幅度高达 5.98 ℃。这种变化可能会对当地固沙植被的种子萌发、生长发育产生一定的影响,但具体的影响机制还需进一步研究。

河西走廊荒漠－绿洲过渡带影响土壤温度的主要气象因素有气温、气压、太阳辐射、相对湿度。其中,气温是影响土壤温度的主要因素,不同层次土壤温度都会受到气温的影响。这与热带湿润地区有所差别,有关研究发现,在热带湿润地区,降水是影响土壤温度的主要因素之一[6,23]。而本研究发现,降水对河西走廊荒漠－绿洲过渡带土壤温度的影响不显著,这主要是由于研究区多年平均降水量只有 117 mm,而且 50% 左右的降水都为 <5 mm 的降水,且降水比较集中。

在本研究中,笔者发现 3 个特征差异明显的土壤温度层次:0～20 cm 土壤温度活跃层,40 cm 土壤温度过渡层和 60～100 cm 土壤温度稳定层。张文纲等[24]在西藏地区也发现,0～20 cm 土壤温度是活跃层,主要受地－气间热量交换状况的影响;而朱宝文等[25]在青海地区研究发现,0～40 cm 为土壤温度活跃层,与大气温度显著正相关,80 cm 为过渡层;杨梅

学等[26]对西藏土壤温度研究发现60 cm以上土壤温度变化曲线为明显的正弦曲线,主要受太阳辐射影响,同时也存在随土壤层次增加,土壤温度响应滞后的现象。韩晓[5]通过对巴丹吉林沙漠腹地研究发现,0~40 cm土壤温度日变化最为强烈,同时发现最高土壤温度从10 cm开始随着土壤深度增加反应时间滞后2 h左右。本研究发现,土壤最高温度的滞后时间也在2 h左右,但变化层次稍有差别,为0~20 cm土层,这可能与巴丹吉林沙漠过渡带特殊的土壤理化性质差异有关,有待进一步验证。

4 结 论

(1) 土壤温度日变化与月变化大致呈正弦曲线,各层土壤最高、最低温出现的时间随着土壤深度的增加逐渐推迟;春、夏季日均土壤垂直温度梯度为正值,秋、冬季日均土壤垂直温度梯度为负值。夏季土壤的日平均温度最大,冬季最小;随土壤深度增加各层土壤温度日较差呈现逐层减小趋势。年平均土壤温度变化呈不规则变化,总体来说地表温度最高,随着深度的加深表现出先减小后增加的趋势。

(2) 明确了该区3个特征差异明显的土壤温度层次:0~20 cm土壤温度活跃层,40 cm土壤温度过渡层和60~100 cm土壤温度稳定层,与其他地区结果有所差异,其原因可能与巴丹吉林沙漠过渡带特殊的土壤理化性质差异有关。

(3) 通过相关分析发现,气温是影响该区土壤温度的最主要的气象要素,不同层次土壤温度都会受到气温的影响;而降水对本地区土壤温度的影响不明显,这与热带湿润地区情况有所不同。

本研究仅是荒漠-绿洲过渡带中一个站点的结果,有一定的局限性,但与已有的相关研究相比仍有一定的典型性和代表性,要深入了解荒漠-绿洲过渡带土壤温度的变化规律还有许多工作要做。

致谢:感谢中国科学院临泽站对本论文提供的数据支持,谨致谢忱!

参考文献(References):

〔1〕 李崇银.气候动力学引论〔M〕.北京:气象出版社,1995:290-296.〔Li Chongyin. Climate Dynamics Introduction〔M〕. Beijing: China Meteorological Press,1995:290-296.〕

〔2〕 胡健,吕一河,傅伯杰,等.祁连山排露沟流域土壤水热与降雨脉动沿海拔梯度变化〔J〕.干旱区研究,2017,34(1):151-160.〔Hu Jian,Lü Yihe,Fu Bojie,et al. Soil hydrothermal variation and rainfall pulses along altitudinal gradient in Pailugou watershed in the Qilian mountain〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(1):151-160.〕

〔3〕 胡铭,刘志辉,陈凯,等.雪盖影响下季节性冻土消融期的土壤温度特征分析〔J〕.水土保持研究,2013,20(3):39-43.〔Hu Ming,Liu Zhihui,Chen Kai,et al. Characteristics of soil temperature analysis under the influence of snow cover in the ablation period of seasonal frozen soil〔J〕. Research of Soil and Water Conservation,2013,20(3):39-43.〕

〔4〕 Kang S,Kim S,Oh S,et al. Prediction spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography surface cover and air temperature〔J〕. Forest Ecology and Management,2000,136(1/3):173-184.

〔5〕 韩晓.巴丹吉林沙漠腹地土壤温度观测及其变化特征〔D〕.兰州:兰州大学,2013.〔Han Xiao. Observation and Variation Characteristics of Soil Temperature in the Badain Jaran Desert Hinterland〔D〕. Lanzhou:Lanzhou University,2013.〕

〔6〕 张慧智,史学正,于东升,等.中国土壤温度的季节性变化及其区域分异研究〔J〕.土壤学报,2009,46(2):227-234.〔Zhang Huizhi,Shi Xuezheng,Yu Dongsheng,et al. Easonal and regional variations of soil temperature in china〔J〕. Acta Pedologica Sinica,2009,46(2):227-234.〕

〔7〕 陆晓波,徐海明,孙丞虎,等.中国近50 a地温的变化特征〔J〕.南京气象学院学报,2006,29(5):706-712.〔Lu Xiaobo,Xu Haiming,Sun Chenghu,et al. Characteristics of soil temperature variations in China in recent 50 years〔J〕. Journal of Nanjing Institute of Meteorology,2006,29(5):706-712.〕

〔8〕 赵舒曼,左洪超,卫翔谦,等.干旱区地膜覆盖农田下垫面对东亚气候效应的数值模拟〔J〕.干旱区研究,2018,35(2):143-153.〔Zhao Shuman,Zuo Hongchao,Wei Xiangqian,et al. Numerical simulation of climate effect in East Asia by plastic film mulching farmland in arid area〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(2):143-153.〕

〔9〕 杨梅学,姚檀栋,Toshio Koike.藏北高原土壤温度的变化特征〔J〕.山地学报,2000,18(1):13-17.〔Yang Meixue,Yao Tandong,Toshio Koike. Variation features of soil temperature in Northern Tibetan Plateau〔J〕. Journal of Mountain Science,2000,18(1):13-17.〕

〔10〕 Rossi E S,Mendes M C,Junior O P,et al. Agronomics characteritcs of wheat cultivars in response to urea treaded with urease inhibitor in coverage〔J〕. Applied Research & Agrotechnology,2014,6(3):39-46.

〔11〕 高红贝,邵明安.干旱区降雨过程对土壤水分与温度变化影响研究〔J〕.灌溉排水学报,2011,30(1):41-45.〔Gao Hongbei,Shao Ming'an. Effect of rainfall on soil water and soil temperature in arid region〔J〕. Journal of Irrigation and Drainage,2011,30(1):41-45.〕

〔12〕 Wan G N,Yang M X,Wang X J,et al. Variations in soil temperature at BJ site on the central Tibetan Plateau〔J〕. Journal of Mountain Science,2012,9(2):274-285.

〔13〕 高琳,潘志华,杨书运,等.覆膜对旱地马铃薯田土壤温湿度及温室气体排放的影响〔J〕.干旱区资源与环境,2017,31(6):136-141.〔Gao Lin,Pan Zhihua,Yang Shuyun,et al. Effect of different plastic film mulching methods on soil temperature-humidity and greenhouse gases emission in the rainfed potato field〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2017,31(6):136-141.〕

〔14〕柳媛普,李耀辉,王胜,等. 河西走廊中段干旱荒漠区土壤水热状况初步分析〔J〕. 干旱区资源与环境,2011,25(5):204－208.〔Liu Yuanpu,Li Yaohui,Wang Sheng,et al. Soil temperature and water in arid desert area in the midst of Hexi Corridor〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2011,25(5):204－208.〕

〔15〕Stone P J,Sorensen I B,Jamieson P D. Effect of soil temperature on phenology canopy development biomass and yield of maize in a cool-temperate climate〔J〕. Field Crops Research,1999,63(2):169－178.

〔16〕苗鹭. 长春市植物物候对城市地表温度的响应〔D〕. 长春:东北师范大学,2009.〔Miao Lu. Response of Plant Phenology to Urban Land Surface Temperature in Changchun〔D〕. Changchun:Northeast Normal University,2009.〕

〔17〕杨丽萍,代海燕,陈素华,等. 气候变化对科尔沁沙地木本植物物候期的影响〔J〕. 干旱区研究,2017,34(3):518－523.〔Yang Liping,Dai Haiyan,Chen Suhua,et al. Effects of climate change on phenophase of woody plants in the Horqin sandy land〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(3):518－523.〕

〔18〕张永梅,黄刚,唐立松,等. 一年生荒漠植物对土壤氮素的生理响应〔J〕. 干旱区研究,2018,35(3):640－647.〔Zhang Yongmei,Huang Gang,Tang Lisong,et al. Physiological response of annual desert plants to soil nitrogen〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(3):640－647.〕

〔19〕刘敏国,王士嘉,陆姣云,等. 河西走廊藜麦 C、N、P 生态化学计量学特征对物候期的响应〔J〕. 干旱区研究,2018,35(1):192－198.〔Liu Minguo,Wang Shijia,Lu Jiaoyun,et al. Response of C,N and P stoichiometry of *Chenopodium quinoa* to phenological phase in the Hexi Corridor〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(1):192－198.〕

〔20〕钟波元. 大气和土壤增温对杉木幼苗地上物候、生长和新近光合产物分配的影响〔D〕. 福建:福建师范大学,2017.〔Zhong Boyuan. Shoot Phenology,Growth Dynamics and Allocation of Recently Fixed Carbon of Chinese Fir Seedlings in Responses to Simulated Air and Soil Warming〔D〕. Fujian:Fujian Normal University,2017.〕

〔21〕宋小艳,王根绪,冉飞,等. 东北大兴安岭演替初期泰加林灌草层典型植物开花物候与生长对模拟暖干化气候的响应〔J〕. 植物生态学报,2018,42(5):539－549.〔Song Xiaoyan,Wang Genxu,Ran Fei,et al. Flowering phenology and growth of typical shrub grass plants in response to simulated warmer and drier climate in early succession Taiga forests in the Da Hinggan Ling of North-East China〔J〕. Chinese Journal of Plant Ecology,2018,42(5):539－549.〕

〔22〕战昊. 白桦根系生长动态及其与温度关系研究〔D〕. 沈阳:沈阳农业大学,2018.〔Zhan Hao. Studies on Growth Dynamics of Betula Platyphylla Roots and Its Relationship with Temperature〔D〕. Shenyang:Shenyang Agricultural University,2018.〕

〔23〕Lamberty B B,Wang C K,Gower S T. Spatiotemporal measurement and modeling of stand-level boreal forest soil temperatures〔J〕. Agricultural and Forest Meteorology,2005,131:27－40.

〔24〕张文纲,李述训,庞强强. 近 45 年青藏高原土壤温度的变化特征分析〔J〕. 地理学报,2008,63(11):1 151－1 159.〔Zhang Wengang,Li Shuxun,Pang Qiangqiang. Variation characteristics of soil temperature over Qinghai-Xizang Plateau in the past 45 years〔J〕. Acta Geographica Sinica,2008,63(11):1 151－1 159.〕

〔25〕朱宝文,张得元,哈承智,等. 青海湖北岸土壤温度变化特征〔J〕. 冰川冻土,2010,32(4):844－850.〔Zhu Baowen,Zhang Deyuan,Ha Chengzhi,et al. Variation characteristics of the ground temperatures on the northern shore of the Qinghai Lake〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2010,32(4):844－850.〕

〔26〕杨梅学,姚檀栋,丁永建,等. 藏北高原土壤温度的日变化〔J〕. 环境科学,1999,20(3):6－8.〔Yang Meixue,Yao Tandong,Ding Yongjian,et al. The diurnal variation of the soil temperature in the Northern Part of Tibetan Plateau〔J〕. Environmental Science,1999,20(3):6－8.〕

Variation of Soil Temperature in the Desert-Oasis Ecotone

GOU Qian-qian[1], LI Qiao-qiao[1,3], QU Jian-jun[2], WANG Guo-hua[1]

(1. *College of Geographic Sciences*, *Shanxi Normal University*, *Linfen* 041004, *Shanxi*, *China*;

2. *Key Laboratory of Desert and Desertification*, *Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*;

3. *College of Geography and Environmental Science*, *Northwest Normal University*, *Lanzhou* 730070, *Gansu*, *China*)

Abstract: In this study, the data of soil temperature and meteorological factors at a station in an inland river basin in Linze from 2004 to 2014 were used to analyze the soil temperature variation and its main affecting factors in the desert-oasis ecotone in central Hexi Corridor. The results showed that both the daily and monthly changes of soil temperature were sine-curve-shaped, and the occurrence time of the highest and lowest temperature in each soil layer was gradually delayed with the increase of soil depth. The average annual soil temperature was generally decreased at first and then increased with the increase of soil depth. The correlation between air temperature and soil temperature was the most significant. Three distinct layers of soil temperature in this region were defined, i. e., the soil layers of 0－20 cm deep, around 40 cm deep and 60－100 cm deep. Finally, the empirical prediction equations between meteorological indexes and soil temperature of each soil layer were developed using the correlation analysis and the multiple stepwise linear regression.

Key words: desert-oasis ecotone; soil temperature; variation characteristic; Linze; Hexi Corridor